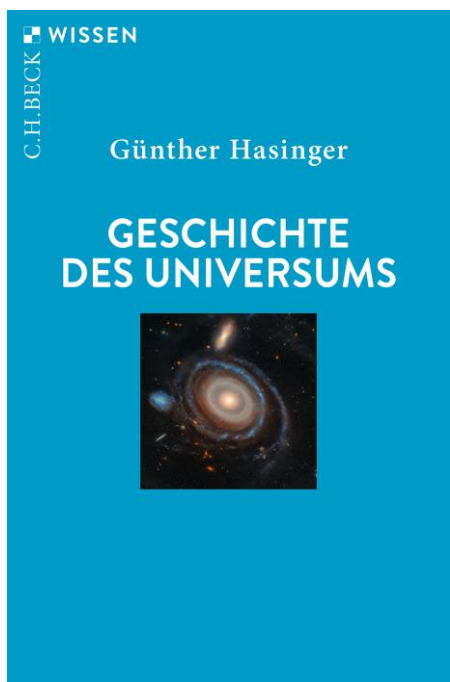


Unverkäufliche Leseprobe



Günther Hasinger
Geschichte des Universums

2025. 127 S., mit 28 Abbildungen und 1 Tabelle
ISBN 978-3-406-83677-0

Weitere Informationen finden Sie hier:
<https://www.chbeck.de/38770666>

C.H.BECK  WISSEN

Der nächtliche Sternenhimmel hat die Menschen von jeher fasziniert, unendliche Weite und, trotz der Bewegung der Sterne, Beständigkeit suggeriert. Mit fortschreitender Technik hat sich unser Bild vom Universum inzwischen immer mehr verfeinert. Wir können so weit und detailliert wie nie zuvor in die Ferne blicken und dabei nicht nur Vieles über die Zusammensetzung und die Gesetzmäßigkeiten, sondern auch über die Geschichte des Universums erfahren. Überall auf der Welt sind Forscher dabei, ständig astrophysikalische Beobachtungen zu machen und neue Erkenntnisse zu gewinnen. Mit diesem anschaulich geschriebenen Buch liegt eine kompakte Darstellung der Geschichte des Universums auf dem neuesten Forschungsstand vor.

Günther Hasinger ist nach Forschungsstationen in Garching, Potsdam und Hawaii sowie als Wissenschaftsdirektor der Europäischen Weltraumorganisation ESA seit 2023 designierter Gründungsdirektor des Deutschen Zentrums für Astrophysik.

Günther Hasinger

GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

C.H.Beck

Mit 28 Abbildungen und 1 Tabelle

Originalausgabe

© Verlag C.H.Beck GmbH & Co. KG, München 2025

Wilhelmstraße 9, 80801 München, info@beck.de

Alle urheberrechtlichen Nutzungsrechte bleiben vorbehalten.

Der Verlag behält sich auch das Recht vor, Vervielfältigungen dieses Werks zum Zwecke des Text and Data Mining vorzunehmen.

www.chbeck.de

Reihengestaltung Umschlag: Uwe Göbel (Original 1995, mit Logo),
Marion Blomeyer (Überarbeitung 2018)

Umschlagabbildung: Galaxie LEDA 1313424, © NASA, ESA,
Imad Pasha (Yale), Pieter van Dokkum (Yale)

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen

Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen

Printed in Germany

ISBN 978 3 406 83677 0



MIX
Papier | Fördert
gute Waldnutzung
FSC® C019821

verantwortungsbewusst produziert

www.chbeck.de/nachhaltig

produktsicherheit.beck.de

Inhalt

Einleitung	7
1. Anfangsbedingungen des Universums	10
Der Horizont	10
Inflation	14
Kräfte und Kraftteilchen	16
Ausfrieren	18
2. Von der Quark-Suppe zur normalen Materie	21
Quark-Suppe	21
Hadronen	24
Baryonen	25
Leptonensterben	27
Primordiale Elementsynthese	28
3. Aufklaren	32
Einfang der Elektronen	32
Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung	33
Fluktuationen des Hintergrundes	35
Der Klang des Feuerballs	36
Ein einzelner kosmischer Trommelschlag	40
4. Entstehung und Entwicklung von Galaxien	42
Detaillierte kosmologische Simulationen	42
Ein neues Bild der Milchstraße	47
Die tiefsten Aufnahmen mit HST und JWST	50
Kosmische Geschichte der Sternentstehung	53
5. Stern- und Planetenentstehung	56
Voraussetzung für Sternentstehung	56

Selbstpropagierende Sternentstehung	59
Das Drehimpuls-Problem	60
6. Killer-Asteroiden und interstellare Besucher	65
Planetare Verteidigung	65
Interstellare Besucher	69
Der Kometen-Jäger	72
7. Das Leben der Sterne	73
Das Hertzsprung-Russel-Diagramm	73
Die <i>Gaia</i> -Revolution	77
8. Endstadien der Sternentwicklung	80
Weiße Zwerge	80
Neutronensterne	83
Schwarze Löcher	91
9. Die Entstehung der Elemente	94
Kernfusion in Sternen	94
Neutronen-Einfangprozesse	98
10. Massereiche Schwarze Löcher	103
Supermassereiche Schwarze Löcher	103
Das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum	106
Intermediäre Schwarze Löcher	110
11. Einige ungelöste Probleme	113
Woher kommen die frühesten Schwarzen Löcher?	113
Woher kommt die Dunkle Materie?	116
Die Hubble-Spannung und die Dunkle Energie	119
Anmerkungen	123
Bildnachweis	127

Einleitung

Im Jahr 2007 wurde mein erstes Buch «Das Schicksal des Universums» veröffentlicht. In der Zwischenzeit ist sehr viel passiert, und neue Erkenntnisse haben unseren Blick auf die Geschichte des Universums und seiner Bestandteile deutlich erweitert. Persönlich durfte ich in dieser Zeit ebenfalls sehr viele neue Erfahrungen sammeln. Deshalb ist es Zeit mit diesem kompakten Band eine neue Bestandsaufnahme und ein Nachschärfen meiner damaligen Erzählung vorzunehmen.

Im September 2008 wurde der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf das erste Mal eingeschaltet und in den folgenden Jahren die Kollisionsenergie der beschleunigten Protonen schrittweise auf 14 Teraelektronenvolt erhöht. Das ist etwa die Energie, die im Universum eine Billiardstelsekunde nach dem Urknall herrschte. Die Physiker hatten riesige Erwartungen in den LHC gesetzt und hofften, damit den Geheimnissen des Urknalls auf die Spur zu kommen. In der Tat wurden ihre Erwartungen zunächst nicht enttäuscht. Im Juli 2012 gab das CERN offiziell bekannt, ihre «Urknallmaschine» hätte das letzte noch fehlende Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik entdeckt, das Higgs-Boson. Bereits im Jahr darauf bekamen die beiden theoretischen Teilchenphysiker Peter Higgs und François Englert den Nobelpreis für Physik. Beide Forscher hatten die Existenz dieses Teilchens in den 1960er-Jahren vorhergesagt.

Der LHC wurde ebenfalls erfolgreich eingesetzt, um mit Hilfe von schweren Ionen ein sogenanntes Quark-Gluon-Plasma zu erzeugen. Das ist ein Zustand, der im Universum etwa eine Zehntausendstelsekunde nach dem Urknall geherrscht haben muss. Um das auf der Erde nachzustellen, ließen die Forschenden Blei-Ionen bei sehr hohen Energien kollidieren. Dadurch werden Quarks, aus denen die Protonen und Neutronen unserer normalen Materie bestehen, und die Gluonen, die sie darin zu-

sammenhalten, aus den Teilchen herausgezogen und für kurze Zeit entsteht ein hochenergetisches Plasma, an dem man die Entstehung der schweren Teilchen – der sogenannten Hadronen – untersuchen kann.

In anderer Hinsicht wurden die Physiker jedoch enttäuscht. Viele Kollegen – auch ich – waren überzeugt, dass der LHC neben dem Higgs-Teilchen noch einen ganzen Zoo weiterer neuer Teilchen entdecken würde. Die Annahme war, dass es für jede bekannte Teilchenart noch einmal einen sogenannten supersymmetrischen Partner gibt. Das leichteste von ihnen hätte dann die lange Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie beendet. Doch die supersymmetrischen Teilchen bleiben weiter im Verborgenen. Ich hatte im Jahr 2004 sogar eine Flasche Champagner auf dieses Ergebnis verwettet, die ich nun 20 Jahre später kleinlaut einlösen musste. Andere, immer komplexere physikalische Experimente suchen bisher erfolglos nach dem Teilchen der Dunklen Materie. Über dieses Thema gibt es in der Reihe C.H.Beck Wissen ein eigenes Buch von Sibylle Anderl,¹ auf das ich mich im Weiteren bei diesem Thema beziehe. Allerdings deutet sich in jüngster Zeit vielleicht eine Lösung des Rätsels der Dunklen Materie an: Könnte es sich dabei möglicherweise um primordiale Schwarze Löcher handeln? Davon wird am Ende dieses Buches die Rede sein.

Auch in der Astrophysik gab es dramatische Entwicklungen: Im September 2015 wurden von den LIGO-Gravitationswelleninferometern die ersten Signale von der Vereinigung zweier Schwarzer Löcher gemessen und im Februar 2016 bekannt gegeben. Im August 2017 entdeckten die US-amerikanischen LIGO-Detektoren und das italienische Virgo-Instrument die ersten Signale von der Vereinigung zweier Neutronensterne, was der Jagd nach dem Verständnis der Entstehung der schweren Elemente neuen Auftrieb verlieh. Noch im selben Jahr erhielten Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish für die Entdeckung der Gravitationswellen den Nobelpreis für Physik.

Im Oktober 2017, wenige Monate bevor ich meine Aufgabe als Direktor des Astronomischen Instituts der Universität Hawaii beendete und als Wissenschaftsdirektor zur Europäischen Welt-

raumorganisation ESA wechselte, entdeckten meine Kollegen auf dem lieb gewonnenen Archipel den ersten Interstellaren Besucher ‘Oumuamua und eröffneten damit einen ganz neuen Zweig der Astronomie. Für die Entdeckung der extrasolaren Planeten erhielten Michel Mayor und Didier Queloz 2019 den Nobelpreis für Physik. Bereits seit 2014 hatte das Radioobservatorium ALMA in der chilenischen Atacama Hochebene mit 64 Antennen sein höchstes Auflösungsvermögen erreicht und in der Folge immer höher aufgelöste Beobachtungen von protoplanetaren Scheiben und der Planetenentstehung darin ermöglicht. Inzwischen kennen wir mehr als 5000 extrasolare Planeten und fast 1000 protoplanetare Scheiben.

Mit den endgültigen Ergebnissen der ESA-Mission *Planck Surveyor* wurde im Jahr 2018 der Goldstandard der Kosmologie veröffentlicht, nachdem die Mission mehr als 30 Monate perfekt gearbeitet und mit ihren beiden Instrumenten mehr als fünf vollständige Himmelsdurchmusterungen durchgeführt hatte. Die ESA-Mission *Gaia* wurde im Jahr 2013 gestartet und beendete ihre Beobachtungen am 15. Januar 2025, kurz vor der Fertigstellung dieses Buches. Ihre endgültigen Daten werden allerdings erst am Ende des Jahrzehnts zur Verfügung stehen. *Gaia* ist eine fantastische Mission, die bereits auf vielen Gebieten der Astrophysik eine Revolution eingeläutet hat und deren Forschungsergebnisse sich durch dieses ganze Buch ziehen. Derzeit werden jeden Tag etwa fünf referierte Publikationen veröffentlicht, deren Ergebnisse auf *Gaia*-Daten basieren.

Die Jahre 2018 bis 2020 standen ganz im Zeichen der Schwarzen Löcher. Im April 2019 wurde das erste Bild des Lichtringes nahe dem Ereignishorizont eines supermassereichen Schwarzen Loches, des riesigen Zentralobjektes in der Galaxie M87 im Zentrum des Virgo-Haufens, veröffentlicht. Der Kollaboration rund um das Event-Horizon-Telescope (EHT) wurde dafür im Jahr 2020 der Breakthrough Prize für Fundamentalphysik verliehen. Ein ähnliches Bild des Schwarzen Loches im galaktischen Zentrum wurde im Mai 2022 veröffentlicht. Im gleichen Jahr (2020) ging der Nobelpreis für Physik an Roger Penrose, Reinhard Genzel und Andrea Ghez für den theoretischen Beweis der Existenz

von Schwarzen Löchern bzw. die Entdeckung des supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum unserer Milchstraße.

Eines der bewegendsten Ereignisse der letzten Jahre – auch für meine Zeit als Wissenschaftsdirektor der ESA – war der Start des James-Webb-Space-Teleskops an Weihnachten 2021 auf einer Ariane-5-Rakete von Kourou in Französisch-Guayana. Dieses wohl komplexeste und teuerste Gerät der Astronomie ist das Ergebnis einer Kooperation zwischen der NASA, der ESA und der kanadischen Raumfahrtagentur CSA. Trotz jahrelanger Verzögerungen und Kostensteigerungen, die hauptsächlich die NASA abgefangen hat, stieg die Rakete an diesem Weihnachtstag inmitten der Coronapandemie majestätisch in den Himmel und hat seit diesem Tag nicht nur tadellos funktioniert, sondern sogar weitaus besser als geplant. Mein kleiner Beitrag zu der Mission war die Entscheidung, Kameras auf die Oberstufe der Ariane-5-Rakete zu montieren. Dadurch können die historischen Aufnahmen der Separation des Teleskopes nun für lange Zeit in unserer Erinnerung bleiben und neue Faszination wecken.

Bereits an dieser Stelle möchte ich meinen großen Dank aussprechen für die Unterstützung, die ich bei der Vorbereitung dieses Bandes erfahren durfte. Mein Dank geht einerseits an den Verlag C.H.Beck und Daniela von Aretin, die diesen Text von Anfang an mit Sorgfalt und Liebe lektoriert hat. Andererseits an meinen Kollegen Stefan Witschas vom Deutschen Zentrum für Astrophysik, der auch in für ihn persönlich schwieriger Zeit keine Mühen scheute und mir wertvolle Hinweise zur besseren Allgemeinverständlichkeit des Buches gab.

1. Anfangsbedingungen des Universums

Der Horizont

«Der Horizont vieler Menschen ist ein Kreis mit Radius Null – und das nennen sie ihren Standpunkt.» Dieses Zitat wird oft Albert Einstein zugeschrieben, stammt aber vermutlich von seinem

Zeitgenossen David Hilbert, einem der einflussreichsten Mathematiker des ausgehenden 19. und beginnenden 20. Jahrhunderts. Trotzdem ist es für den Beginn unserer kosmologischen Betrachtungen sehr hilfreich, weil die Krümmung des Horizonts eine wichtige Aussage über die Größe des Ganzen erlaubt. Stellen Sie sich vor, Sie stehen am Meeresstrand und schauen auf den Horizont. Früher dachten wohl viele Menschen, sie könnten das Ende der Erde sehen und würden, wenn sie dorthin führen, am Rand hinunterfallen. (Sogar heute gibt es noch etliche von diesen Flache-Erde-Propheten.) Aber bereits die alten Griechen, zum Beispiel Eratosthenes von Kyrene, wussten sehr genau, dass die Erde eine Kugel ist. Er hatte den Erdumfang erstaunlich genau mit etwa 40 000 Kilometern angegeben. Der Radius unseres Horizonts ist, abhängig von der Höhe des Beobachters, etwa 10 Kilometer. Wenn Sie also zum Horizont fahren, sehen Sie wieder einen Horizont und so weiter. Das können Sie etwa 4000 Mal wiederholen, bevor Sie wieder zum Ausgangspunkt kommen. Die Fläche des für uns sichtbaren Horizonts ist weniger als ein Millionstel der gesamten Erdoberfläche!

Wären Sie der kleine Prinz von Antoine de Saint-Exupéry, der zusammen mit seiner Rose auf dem Asteroiden B 612 lebt, wäre Ihr Horizont stark gekrümmt und Sie wüssten, dass Sie auf einem sehr kleinen Himmelskörper leben. Die Flachheit des Horizonts ist ein Maß für die relative Größe des Körpers, auf oder in dem Sie leben. Lassen Sie uns dieses Prinzip auf das ganze Universum anwenden!

Das *Dark Energy Spectroscopic Instrument* hat aufbauend auf früheren spektroskopischen Durchmusterungen die größte dreidimensionale Karte unseres Universums angefertigt. Ein Ausschnitt ist in Abbildung 1 zu sehen. Faszinierend sind die großräumigen kosmologischen Strukturen, die Filamente, auf denen wie auf Perlenschnüren die Galaxien angeordnet sind. Die großen Leerräume sowie die riesigen Galaxienhaufen an den Knotenpunkten erzeugen das «kosmische Netz». Diese Strukturen werden durch die Wirkung der Schwerkraft erzeugt, wie sie in den größten kosmologischen Simulationen auf den modernsten Supercomputern vorhergesagt werden (siehe Abbildung 2).

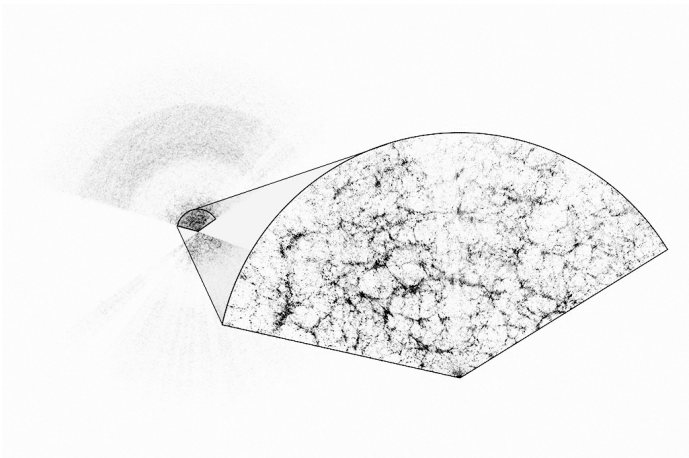


Abbildung 1: Das *Dark Energy Spectroscopic Instrument* DESI hat die bisher größte dreidimensionale Karte unserer kosmischen Umgebung produziert. Im Zentrum der Darstellung befindet sich die Sonne. In dem vergrößerten dünnen Ausschnitt ist die großräumige Struktur des Universums deutlich zu erkennen.

Entsprechend des derzeitigen Standardmodells der Kosmologie entstehen diese Strukturen aus den winzigen Fluktuationen, die wir auf dem Baby-Bild des Universums anhand der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung erkennen können, wie es zuletzt von der *Planck*-Mission der ESA aufgenommen wurde. Die *Planck*-Daten, können zusammen mit Daten der sogenannten Baryonischen Akustischen Oszillationen (siehe unten) benutzt werden, um die Krümmung des Horizonts unseres Universums zu bestimmen. Danach hat unser Universum eine vernachlässigbar kleine Krümmung von 0.0007 ± 0.0019 und ist damit bis auf eine Genauigkeit von 0.2 % absolut flach!²

Wie bei dem Beispiel des Erdhorizonts am Meeresstrand ist der kosmische Horizont nur eine Art optischer Täuschung. Die kommt dadurch zustande, dass das früheste Licht, das unsere Teleskope erreichen kann, vor etwa 13.8 Milliarden Jahren ausgesandt wurde. Das ist das «Baby-Bild» des Universums, das wir im Mikrowellen-Hintergrundbild der *Planck*-Mission sehen. Die

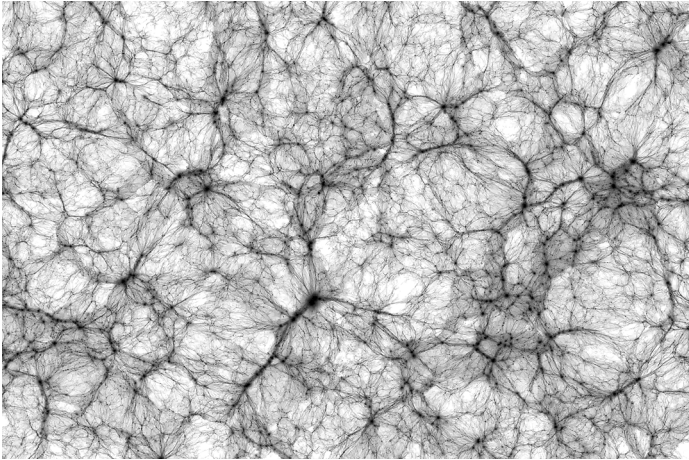


Abbildung 2: Ausschnitt der derzeit größten kosmologischen Simulation des *Illustris-TNG* Projekts. Die dargestellte Region hat eine Größe von etwa 1.2 Milliarden Lichtjahren. Dargestellt ist die großräumige Struktur der normalen baryonischen Materie.

Strahlung wurde ausgesandt, als das Universum etwa 380 000 Jahre alt war, damals als Licht einer etwa 3000 Grad heißen Plasmakugel (ähnlich der Oberfläche eines Sterns etwas kälter als die Sonne). Die Temperatur des Universums war zu diesem Zeitpunkt so weit abgekühlt, dass sich aus dem Urknall-Plasma neutrale Wasserstoff- und Heliumatome bilden konnten und damit das Medium durchsichtig wurde. Weil sich das Universum seitdem um etwa den Faktor 1100 ausgedehnt hat, sehen wir dieses Licht heute als Radio- bzw. Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit einer Temperatur von etwa drei Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. Der Ort, an dem dieses Licht ausgesandt wurde, ist heute wegen der Ausdehnung des Universums wesentlich weiter von uns entfernt, etwa 46 Milliarden Lichtjahre. Diesen Radius könnte man als das sichtbare Universum bezeichnen.

Aber die Flachheit des Horizonts deutet darauf hin, dass das Volumen unseres Universums jenseits des beobachtbaren Bereichs viele Zehnerpotenzen größer ist. Legt man die Planck-Daten zu-

grunde, ist der Radius des gesamten Universums mindestens 200-mal größer als das beobachtbare. Das entspricht einem mindestens 15 Millionen-mal größerem Volumen. Die Antwort auf die Frage, was sich jenseits unseres Universums befindet ist also: «wieder Universum», und zwar mindestens genau so viel mehr, wie es dem Verhältnis unseres Horizonts zur gesamten Erdoberfläche entspricht. Unserer derzeitigen Information zufolge könnte das Volumen auch unendlich groß sein.

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de